

Modelos globales del campo magnético terrestre para los últimos 3000 años: discrepancias según las bases de datos usadas

Global models of the geomagnetic field for the last 3000 years: differences according to used databases

S. A. Campuzano^{1,2}, M. Gómez-Paccard³, F. J. Pavón-Carrasco^{1,2} y M. L. Osete^{1,2}

1 Dpto. Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I, Universidad Complutense de Madrid, Avd. Complutense s/n 28040 Madrid.

sacampuzano@ucm.es, fjpvon@ucm.es, mlosete@fis.ucm.es.

2 Instituto de Geociencias IGEO, CSIC-UCM, Ciudad Universitaria 28040 Madrid.

3 Institute of Earth Sciences Jaume Almera CSIC, Lluís Sole i Sabaris s/n E-08028-Barcelona. mgomezpaccard@ictja.csic.es.

Resumen: La modelización global del campo magnético terrestre no es sólo fundamental para comprender cómo funciona y varía en el tiempo, sino también para constreñir los modelos de geodinamo y corregir las tasas de producción de isótopos cosmogénicos. Obtener modelos suficientemente realistas depende en gran medida de las bases de datos empleadas. Los datos arqueomagnéticos y volcánicos proporcionan un registro casi instantáneo del campo, debido al proceso de adquisición de la remanencia magnética (termorremanencia). Este hecho los hace idóneos para estudiar en detalle la evolución del campo magnético terrestre. Sin embargo, su distribución espacial y temporal es muy heterogénea. Además la calidad de algunos registros, especialmente de intensidad, es muy variable, lo que produce ciertas inconsistencias en los modelos. En este trabajo presentamos cuatro modelos globales para los últimos 3000 años generados a partir del análisis en armónicos esféricos (SHA) usando diferentes bases de datos: 1) datos arqueomagnéticos (SHA3k.a), 2) datos arqueomagnéticos con un criterio de selección de calidad (SHAQ3k.a), 3) datos arqueomagnéticos y volcánicos (SHA3k.av) y 4) datos arqueomagnéticos y volcánicos aplicando un criterio de selección de calidad (SHAQ3k.av). Se evalúan las discrepancias entre ellos y se comparan con modelos globales del campo geomagnético ya publicados (SHA.DIF.14k, ARCH3k.1, CALS3k.4b, pfm9k.1a).

Palabras clave: Paleomagnetismo, Arqueomagnetismo, Modelización Global.

Abstract: *Global modelling of the geomagnetic field is essential not only to understand how this field works and how it varies but also to constrain geodynamo models and cosmogenic nuclides production rates. Obtaining reliable models relies mainly on used databases. Archaeomagnetic and volcanic data provide a record of magnetic field practically instantaneous, which is due to the acquisition process of the remanence (thermoremanent magnetization). For the last 3000 years the spatial and temporal distribution of the available data, as well as the quality of some of the records, is very heterogeneous. This produces some inconsistencies in the models, and particularly for the intensity results. In this work we present four global models for the last 3000 years generated using different databases: 1) archaeomagnetic data (SHA3k.a), 2) archaeomagnetic data selected following quality criteria (SHAQ3k.a), 3) archaeomagnetic and volcanic data (SHA3k.av) and 4) archaeomagnetic and volcanic data selected following quality criteria (SHAQ3k.av). We present here the differences between them and compare to already published global geomagnetic models (SHA.DIF.14k, ARCH3k.1, CALS3k.4b, pfm9k.1a).*

Key words: *Palaeomagnetism, Archaeomagnetism, Global Modelling.*

INTRODUCCIÓN

La mejora temporal y espacial de la base de datos paleomagnética en las últimas décadas ha hecho posible la generación de modelos globales de campo magnético que han sido utilizados, entre otras cosas, para constreñir los modelos de la geodinamo, o ayudar en disciplinas y estudios aparentemente alejados del geomagnetismo como la arqueología o la paleoclimatología. En particular, la corrección del ritmo de producción de isótopos cosmogénicos que se generan en la atmósfera terrestre y que son empleados posteriormente para obtener reconstrucciones de la

actividad solar en el pasado está modulada por la intensidad del campo magnético terrestre (CMT). Es, por tanto, esencial en el ámbito de las ciencias de la Tierra disponer de modelos suficientemente realistas del CMT. La mayor parte de los modelos globales generados hasta el momento están basados en la metodología clásica de modelización a partir de un desarrollo en armónicos esféricos. Las discrepancias observadas entre los resultados de dichos modelos se explican por las diferentes bases de datos e intervalos temporales utilizados. Por ejemplo, los modelos de la serie CALS (e.g. Korte y Constable, 2011; Korte et al., 2009) y el modelo pfm9k.1a (Nilsson et al., 2014) se caracterizan por usar datos arqueomagnéticos,

volcánicos y sedimentarios de los últimos 9000 años, mientras que los modelos ARCH3k.1 (Korte et al., 2009) y SHA.DIF.14k (Pavón-Carrasco et al., 2014a) sólo utilizan datos arqueomagnéticos y volcánicos, el primero abarcando los últimos 3000 años y el segundo los últimos 14000 años. Estos estudios evidencian que el uso de datos sedimentarios disminuye la variabilidad de los modelos debido a que las variaciones de más corta longitud de onda del campo quedan claramente suavizadas. Este hecho se explica por el tipo de adquisición de la remanencia de los materiales sedimentarios (deposicional o post-deposicional). Sin embargo, los modelos geomagnéticos basados únicamente en datos arqueomagnéticos y/o volcánicos sí son capaces de describir la alta frecuencia de las variaciones del CMT, ya que el tiempo durante el que adquieren la remanencia (termorremanencia) es del orden de horas o días, es decir, es un proceso casi instantáneo en la escala geológica.

Por otra parte, estudios recientes (ver Pavón-Carrasco et al., 2014b, y referencias incluidas en este estudio) señalan que algunos de los datos de arqueointensidad publicados en el pasado y contenidos en la bases de datos actuales no satisfacen criterios de calidad muy básicos. La evolución de los protocolos de laboratorio en la medida de la arqueointensidad en las últimas décadas ha dado lugar a una serie de procedimientos que han resultado ser fundamentales en este tipo de estudios como, por ejemplo, los controles de alteración (pTRM checks) o la corrección del efecto de la anisotropía de la termorremanencia (ATRM). Estos protocolos no han sido aplicados en muchos de los estudios incluidos en la actual base de datos global. La gran dispersión observada en los datos de arqueointensidad se debe probablemente a los diferentes protocolos de laboratorio utilizados para su determinación.

En este trabajo se analiza el efecto del uso de diferentes bases de datos sobre el resultado final de la modelización global. Para ello hemos aplicado diferentes criterios de selección según el tipo y metodología utilizados. Para llevar a cabo el estudio, hemos utilizado únicamente datos de los últimos 3000 años obtenidos a partir del estudio de materiales cuya remanencia tiene un origen térmico. La cantidad de datos utilizados en la generación de todos estos modelos se recoge en la Tabla I.

	Declinación	Inclinación	Intensidad
SHA3k.a	2436	3713	2534
SHAQ3k.a	1696	1814	389
SHA3k.av	2976	4293	2990
SHAQ3k.av	1852	1970	594

TABLA I. Número de datos direccionales y de intensidad utilizados como base de datos en cada uno de los modelos presentados.

MODELIZACIÓN GLOBAL DEL CMT

La metodología clásica normalmente utilizada en la modelización global del CMT se basa en el análisis de armónicos esféricos para la parte espacial y *splines* cúbicos para la temporal (e.g. Pavón-Carrasco et al., 2014a). Dado que la distribución temporal y espacial de los datos arqueomagnéticos (incluyendo volcanes) (Figura 1) no es uniforme, es necesario regularizar el modelo imponiendo condiciones físicas que aseguren un resultado realista. En este trabajo empleamos esta metodología para obtener cuatro tipos diferentes de modelos, basados en diferentes bases de datos y criterios de selección.

Para comenzar crearemos un modelo basado únicamente en datos arqueomagnéticos: el modelo SHA3k.a. La base de datos direccional ha sido seleccionada de GEOMAGIA50v3 (Brown et al., 2015) y actualizada con los últimos trabajos disponibles. La base de datos de arqueointensidad ha sido creada a partir de ArcheoInt (Genevey et al., 2008) y también ha sido actualizada con los trabajos más recientes. Antes de generar el modelo se realiza un preprocesado de los datos de entrada, eliminando posibles outliers y los datos con errores mayores a tres veces la media del error. Con respecto al tiempo, consideramos sólo los datos con incertidumbres menores a 250 años. Teniendo en cuenta el hecho de que un dato paleomagnético está representado como un valor con una cierta incertidumbre, tanto temporal como espacial, calculamos el modelo final a partir de un método bootstrap como el propuesto por Korte et al. (2009).

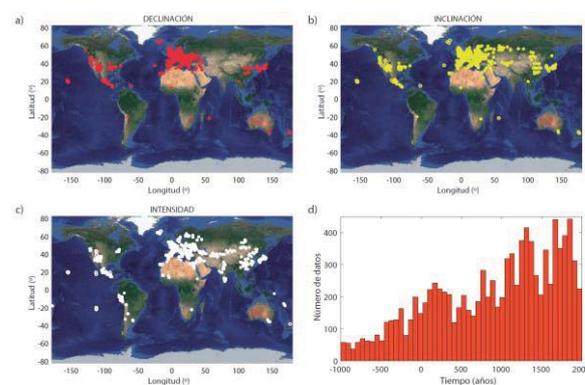


FIGURA 1. Distribución espacial de la base de datos arqueomagnética (círculos cerrados) y volcánica (círculos abiertos) de los últimos 3000 años - a) declinación, b) inclinación y c) intensidad. El apartado d) muestra su distribución temporal considerando todos los datos en su conjunto.

El siguiente modelo que generamos seguirá la metodología ya descrita, cambiando únicamente la base de datos de entrada. En esta ocasión utilizaremos un criterio de selección previo al procesado de datos. Los criterios de selección utilizados están basados en criterios de calidad habitualmente aceptados por la comunidad paleomagnética: el número de muestras/especímenes usados para calcular las medidas

de dirección e intensidad; y el protocolo de laboratorio seguido para determinar la arqueointensidad.

El elemento del CMT más sensible a los criterios de selección es la paleointensidad. En este trabajo hemos considerado los grupos A y B de arqueointensidad descritos en Pavón-Carrasco et al. (2014b).

Además, se presentan los modelos SHA3k.av y SHAQ3k.av, donde se incluyen los datos volcánicos. En el primero se usan todos los datos disponibles, mientras que en el segundo se aplican los criterios de calidad descritos anteriormente.

DISCUSIÓN

La evolución temporal del CMT en la superficie de la Tierra depende de la región geográfica estudiada. A modo de ejemplo, en la figura 2 se muestra la evolución temporal del CMT dada por los nuevos modelos globales en Madrid para los últimos 3000 años obtenidos en este trabajo, junto con los resultados

de modelos globales ya publicados. A excepción de los modelos CALS3k.4b y pfm9k.1a que incluyen sedimentos, para los que las variaciones de más corta frecuencia del campo se suavizan (en especial para el modelo CALS3k.4b), se observan diferencias menores entre todos los modelos presentados para los últimos 2 milenios. Esto es esperable dado que Europa Occidental es la zona donde se encuentra la mayor cantidad de datos de alta calidad (Figura 1). Sin embargo, para periodos anteriores, donde el número de datos de calidad disminuye, existen diferencias importantes en la intensidad (Figura 2c). Para estudiar si la selección de datos tiene un impacto a escala global se ha calculado el momento dipolar (MD) del CMT para cada uno de los modelos propuestos (Figura 3), es decir, el momento magnético asociado a un dipolo centrado e inclinado con respecto al eje de rotación de la Tierra. Se observa que el SHAQ3k.a presenta un MD más bajo que el resto de modelos en algunas épocas como entre el año 0 y 800 d.C. Esto podría estar relacionado con un insuficiente número de datos de alta calidad y una distribución inhomogénea de los mismos.

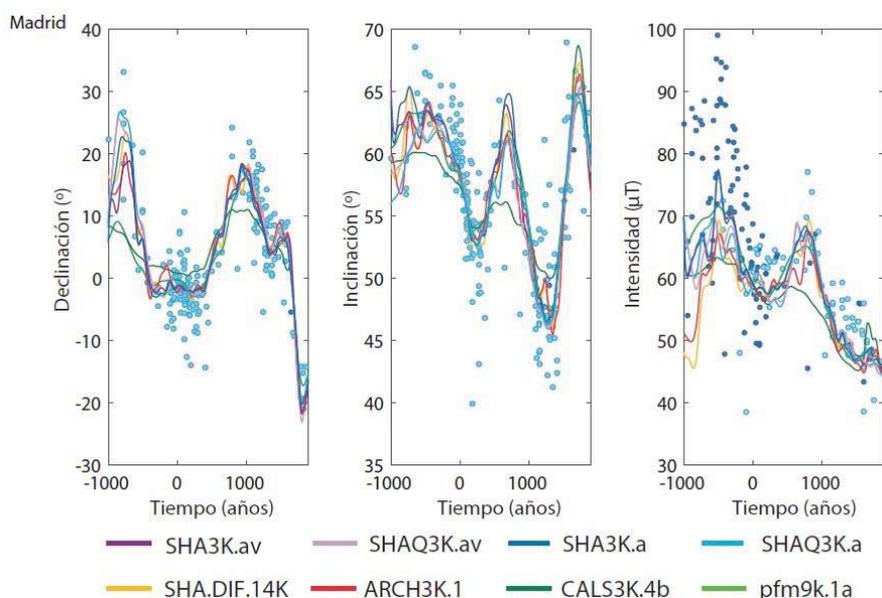


FIGURA 2. Evolución temporal de la declinación, inclinación e intensidad en Madrid durante los últimos 3000 años calculada a partir de diferentes modelos globales (para más detalles ver el texto principal). Los puntos azul claro indican los datos que cumplen el criterio de selección, los azul oscuro los que no lo cumplen. Todos los datos son arqueomagnéticos y situados en la región comprendida dentro de un radio de 900 km de Madrid

Por el contrario, el modelo SHAQ3k.av presenta momentos dipolares más elevados, alcanzando máximos como el de 1400 d.C., que coincide con un máximo local de Hawaii (zona caracterizada solo por datos volcánicos), lo que sugiere una sobreestimación de los datos de esta región.

Finalmente, si comparamos entre sí los modelos sin criterio de selección de calidad, i.e. SHA3k.a y SHA3k.av, observamos que la principal diferencia se encuentra en torno al 800 a.C., debido nuevamente al efecto de los datos de la región de Hawaii. La influencia de esta región está también reflejada en el

resto de los modelos que incluyen datos volcánicos (ARCH3k.1 y el SHA.DIF.14k), con los que el SHA3k.av presenta las menores diferencias dado que las bases de datos utilizadas son análogas, exceptuando los datos más recientes.

Como se puede observar la influencia de la base de datos utilizada es muy importante y condiciona de forma determinante la estimación y variabilidad de uno de los parámetros más importantes que describen al CMT: el MD. Este elemento está directamente relacionado con la paleointensidad, cuya calidad y distribución condiciona en gran medida los resultados.

Aunque en principio se pueda considerar que el mejor modelo debe ser el basado en los datos de mayor calidad, la distribución espacial es también un factor muy importante en la modelización del campo geomagnético. Para investigar si la base de datos seleccionada tiene una distribución adecuada se ha realizado un experimento usando datos sintéticos y modelos recientes del campo. Los resultados indican que la actual base de datos de arqueointensidad de calidad es incompleta para poder obtener a partir de ella un modelo de evolución del CMT realista.

CONCLUSIONES

Hemos obtenido cuatro nuevos modelos globales, SHA3k.a, SHAQ3k.a, SHA3k.av y SHAQ3k.av basados en diferentes bases de datos. Los modelos son consistentes en las regiones, como Europa occidental, en la que predominan los datos arqueomagnéticos de alta calidad. Sin embargo proporcionan diferentes estimaciones del momento dipolar. Resultado a tener en cuenta ya que este parámetro es uno de los más importantes que describen el CMT. Además, la base de datos de arqueointensidad de calidad es incompleta para obtener a partir de ella un modelo realista del CMT.

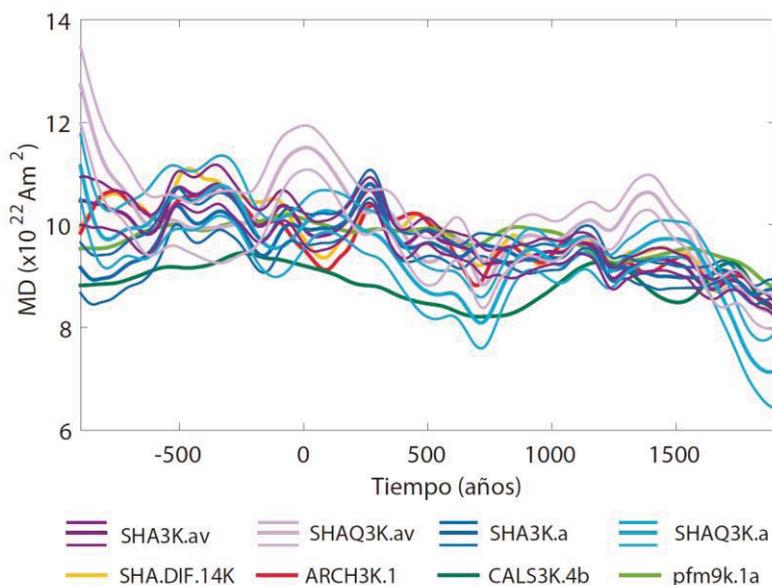


FIGURA 3. Momento dipolar del campo magnético terrestre durante los últimos 3000 años obtenido a partir de diferentes modelos globales de campo magnético (para más detalles ver el texto principal). Se muestran las bandas de error al 95% de nivel de confianza para los nuevos modelos.

AGRADECIMIENTOS

SAC y MLO dan las gracias al proyecto CGL2014-54112-R del Ministerio Español de Economía y Competitividad y a la beca FPI BES-2012-052991, que ha permitido a SAC llevar a cabo este trabajo. FJPC agradece a su proyecto postdoctoral 659901-CLIMAGNET, programa Europeo Marie Curie.

REFERENCIAS

- Brown, M.C., Donadini, F., Korte, M., Nilsson, A., Korhonen, K., Lodge, A., Lengyel, S.N. y Constable, C.G. (2015): GEOMAGIA50.v3: 1. General structure and modifications to the archeological and volcanic database. *Earth Planets Space*, 67:83, doi:10.1186/s40623-015-0232-0.
- Genevey, A., Gallet, Y., Constable, C., Korte, M. y Hulot, G. (2008): ArcheoInt: An upgraded compilation of geomagnetic field intensity data for the past ten millennia and its application to the recovery of the past dipole moment. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9 (4), Q04038.
- Korte, M. y Constable, C.G. (2011): Improving geomagnetic field reconstructions for 0-3 ka. *Phys. Earth Planet. Interiors.*, 188: 247-259.
- Korte, M., Donadini, C. y Constable, C.G. (2009): The geomagnetic field for 0-3 ka, part II: a new series of time-varying global models. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, Q06008.
- Nilsson, A., Holme, R., Korte, M., Suttie, N. y Hill, M. (2014): Reconstructing Holocene geomagnetic field variation: new methods, models and implications. *Geophys. J. Int.*, 198: 229 - 248.
- Pavón-Carrasco, F.J., Osete, M.L., Torta, J.M. y De Santis, A. (2014a): A geomagnetic field model for the Holocene based on archaeomagnetic and lava flow data. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 388: 98-109.
- Pavón-Carrasco, F. J., Gómez-Paccard, M., Hervé, G., Osete, M. L. y Chauvin A. (2014b): Intensity of the geomagnetic field in Europe for the last 3 ka: Influence of data quality on geomagnetic field modeling. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 15, doi:10.1002/2014GC005311.